一种基于备份代价重要度的虚拟网络功能备份方法 *

王　琛[1,2]，汤红波[1]，游　伟[1]，牛　犇[1]

(1. 国家数字交换系统工程技术研究中心，郑州 450000; 2. 中国人民解放军 32128 部队，济南 250000)

摘　要：5G 移动通信网虚拟化场景下，为了保证网络服务的可靠性，通常采用冗余备份的方法。为了降低备份资源成本开销，首先在初始映射视图中计算每个虚拟网络功能的备份代价重要度，每次迭代选择具有最大和次大备份代价重要度的虚拟网络功能进行联合备份，通过相应的选择和更新模型最终得到最优的备份策略。最后，将该方法与其他三种方法进行对比实验，所提算法在备份成本开销、占用的物理节点数量、服务请求接受数量和备份资源利用率上具有良好的性能。

关键词：网络功能虚拟化；虚拟网络功能；服务功能链；备份代价重要度；联合备份

中图分类号：TN915.07　　doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.0389

Method for virtual network function backup based on backup-cost importance

Wang Chen[1,2], Tang Hongbo[1], You Wei[1], Niu Ben[1]

(1. *National Digital Switching System Engineering Technological Research Center*, *Zhengzhou* 450000, *China*; 2. 32128 *Troops of the PLA*, *Jinan* 250000 *China*)

Abstract: In the 5G mobile communication network virtualization scenario, a redundant backup method is usually adopted in order to ensure the reliability of network services. To reduce the cost of backup resources, first, by ordering the Backup-Cost Importance of the virtual network functions, this paper makes a joint backup of virtual network function with the largest and second largest Backup-Cost Importance in each iteration, and obtain the optimal backup strategy through the corresponding selection and update model. Finally, the method is compared with other three methods, the proposed method has better performance in the backup cost, the amount of used physical node, the number of accepted service requests and backup resource utilization.

Key words: network function virtualization; virtual network function; service function chaining; backup-cost importance; joint backup

0　引言

5G 移动通信网中，网络功能虚拟化（network function virtualization, NFV）将成为促进网络创新和业务灵活部署的重要技术，其通过将网络功能从专用硬件平台解耦，使移动网络运营商实现了网络管理的灵活性和扩展性[1]。同时，通过低成本的通用硬件来实现这些网络功能，显著降低了移动网络运营商的资本支出和运营支出。传统移动核心网采用高可靠的专用硬件设备，可靠性可以达到 99.999%，而 5G 网络将采用通用服务器实现网络功能，其可靠性明显低于传统专用硬件设备。在网络功能虚拟化环境下，虚拟网络功能（virtual network function, VNF）作为实例化在通用服务器上的软件，其故障原因将更复杂[2]。网络服务以服务功能链的形式实现，其由多个虚拟网络功能按照一定的顺序构成，端到端网络服务的可靠性不是由单一组件决定，而是由整个服务功能链的所有组件决定[3]。增强移动宽带、海量机器通信和高可靠低时延通信是 5G 通信网络的典型应用场景[4]。5G 移动通信网高可靠场景对移动通信服务的可靠性要求较高，需要支持用户 5 个 9 的可靠性等级的端到端网络服务。因此，如何在满足资源约束的前提下满足网络服务的可靠性需求，是 NFV 技术应用在 5G 网络需要解决的关键问题之一。

冗余备份是提高系统可靠性的通用方法。如何选择备份 VNF 以满足端到端网络服务的可靠性要求是研究点之一[5]。现有的冗余备份方法采用两阶段的方法解决这一问题，通过不断

收稿日期：2018-05-08；**修回日期：**2018-07-14　**基金项目：**国家“863”计划资助项目（2015AA01A706）；国家自然科学基金资助项目（61521003）；国家重点研发计划资助项目（2016YFB0801605）

作者简介：王琛（1988-），男，河南淮阳人，硕士研究生，主要研究方向为移动通信网络，网络功能虚拟化（wangchenhigh@yeah.net）；汤红波（1968-），男，教授，主要研究方向为移动通信网络，新型网络体系结构；游伟（1984-），男，讲师，博士，主要研究方向为移动通信网络安全、新一代移动通信网络技术；牛犇（1992-）男，硕士研究生，主要研究方向为移动通信网络、网络功能虚拟化.

的迭代选择和映射两个过程，直到满足服务的可靠性需求。为了选择备份 VNF，文献[6]备份了整个服务功能链，导致成本开销浪费，增加了移动运营的资本支出。文献[5]提出的 GREP 算法备份每个服务功能链中可靠性较低的 VNF，文献[7]采用混合路由的方式备份 VNF，提出了基于贪婪算法的 GSP 算法，两种算法忽视了 VNF 可以由多个服务功能链共享，导致了较低的资源利用率。

针对上述 VNF 备份方法的不足，本文提出了将选择和映射过程一阶段进行的基于备份代价重要度的 VNF 备份方法，首先根据初始部署的VNF转发图计算每个VNF的备份代价重要度，从而选择出备份 VNF，利用联合备份的方法映射到物理节点上，然后根据更新模型对 VNF 转发图进行更新，通过迭代，最终得到满足可靠性需求的备份 VNF 及映射的物理节点。该方法在满足网络服务可靠性的前提下，能够有效降低备份资源成本开销，而且在服务请求接受率、运营支出上具有较好的性能。

1　网络模型与问题描述

1.1　物理网络与服务功能链请求

定义 $G_p(N,E)$ 表示物理网络拓扑，其中 N 表示物理节点的集合，每个节点具有实例化多个 VNF 的能力。E 表示物理链路的集合。每个节点 $n \in N$ 具有相应的属性，包括计算资源能力 $c(n)$，存储资源能力 $s(n)$，网络资源能力 $b(n)$。定义 r_n 表示物理节点的可靠性值，可以根据平均无故障时间（mean time between failure, MTBF）和平均修复时间（mean time to repair, MTTR）计算得出[8]：

$$r_n = \frac{MTBF_n}{MTBF_n + MTTR_n} \tag{1}$$

定义服务功能链集合 S，对于每个服务功能链 $s_i(i \in [1,|S|]_z)$，具有一组数据流量需要以固定顺序通过的 VNF，定义 $VNF_i(i \in [1,|S|]_z)$ 为服务功能链 s_i 中 VNF 的集合。vnf_{ij} 表示服务功能链 s_i 中的第 j 个 VNF。定义 θ_{req}^i 表示服务功能链 s_i 的可靠性需求。

在对服务功能链请求进行初步部署后,其在物理网络上的逻辑连接视图称为 VNF 转发图,如图 1 所示。定义 $G_{FG}(F,L)$ 表示 VNF 转发图的拓扑,其中 F 表示部署在物理网络上的 VNF 集合,L 表示相邻 VNF 之间的逻辑链路集合。每个 $f \in F$ 具有相应的资源需求,包括计算资源需求 $c'(f)$,存储资源需求 $s'(f)$,网络资源需求 $b'(f)$。

1.2　可靠性评价

导致 VNF 故障的原因很多，比如硬件故障、软件故障和操作故障。本文仅考虑硬件故障，因此可以 VNF f 的可靠性 r_f 可由实例化其的物理节点的可靠性来评价。定义决策变量 x_n^f：

$$x_n^f = \begin{cases} 1 & 若备份VNF\ f实例化在物理节点n上 \\ 0 & 其它 \end{cases} \tag{2}$$

定义 Δ_f 表示冗余备份后 VNF f 的可靠性增量，

$$\Delta_f = (1-(1-r_f)\prod_{n \in N}(1-x_n^f r_n)) - r_f \tag{3}$$

定义 θ_i 表示服务功能链 s_i 的可靠性值，

$$\theta_i = \prod_{f \in VNF_i}(r_f + \Delta_f) \tag{4}$$

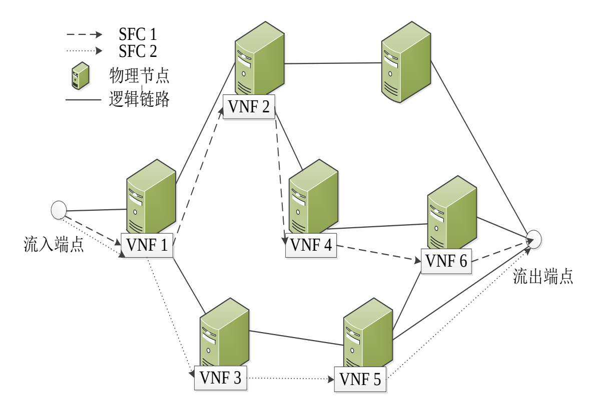


图 1　VNF 转发图示意

1.3　优化目标

导致 VNF 故障的原因很多，比如硬件故障、软件故障和操作故障。

在对服务功能链请求进行初步的映射部署后，其部署方案不能满足一些服务功能链请求的可靠性需求。同时，冗余备份的 VNF 在很长一段时间内不能产生收益，因此本文以冗余备份资源的成本效益为优化目标，找到相应的备份冗余方案。将其建模为

优化目标：

$$\max_{x_n^f,\Delta} \frac{\Delta R}{Backup\ \mathrm{Cost}} \tag{5}$$

约束条件：

$$\theta_i \ge \theta_{req}^i, 其中 i \in S \tag{6}$$

$$\sum_{f \in F} x_n^f c'(f) \le c(n) \tag{7}$$

$$\sum_{f \in F} x_n^f s'(f) \le s(n) \tag{8}$$

$$\sum_{f \in F} x_n^f b'(f) \le b(n), 其中 f \in F, n \in N \tag{9}$$

$$x_n^f \in \{1,0\} \tag{10}$$

式（5）表示最大化备份冗余方案的成本效益。式（6）确保每个服务功能链的可靠性值满足其可靠性需求。式（7）~（9）确保备份 VNF 所占用的计算、存储和网络资源不超过实例化其的物理节点的计算、存储和网络资源能力。本文的主要参数符号定义如表 1 所示。

表 1　主要参数符号和定义

参数	定义
N	物理节点集合
E	物理链路集合
$c(n)$	底层节点 n 的计算资源能力

$s(n)$	底层节点 n 的存储资源能力
$b(n)$	底层节点 n 的网络资源能力
r_n	物理节点 n 的可靠性值
S	服务功能链集合
VNF_i	服务功能链 s_i 中 VNF 的集合
vnf_{ij}	服务功能链 s_i 中的第 j 个 VNF
θ_{req}^i	服务功能链 s_i 的可靠性需求
F	部署在物理网络上的 VNF 集合
L	相邻 VNF 之间的逻辑链路集合
$c'(f)$	VNF f 的计算资源需求
$s'(f)$	VNF f 的存储资源需求
$b'(f)$	VNF f 的网络资源需求
r_f	VNF f 的可靠性值
x_n^f	决策变量，若备份 VNF f 映射在物理节点 n 上，$x_n^f=1$，反之，$x_n^f=0$
Δ_f	冗余备份后 VNF f 的可靠性增量
θ_i	服务功能链 s_i 的可靠性值

2　基于备份代价重要度的虚拟网络功能备份方法

2.1　选择模型

部件可靠性变化引起系统可靠性的变化程度称为概率重要度，又称 Birnbaum 重要度，其有效描述了一个部件状态变化对于系统变化的影响[9]。在可靠性系统里，一个部件 k 的概率重要度定义为：

$$BIM_f=\frac{\sum_{i\in S}\left(\prod_{f\in VNF_i}(r_f+\Delta_f)-\prod_{f\in VNF_i}r_f\right)}{\sum_{f\in F}\Delta_f} \tag{11}$$

为了更好地进行各种资源的分配，定义 d_f 表示备份 VNF f 的资源需求，对于特定的网络环境，可以相应地调整。

$$d_f=\lambda_1c'(f)+\lambda_2s'(f)+\lambda_3b'(f),\quad 其中\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3\in[0,1],\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3=1 \tag{12}$$

$\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3$ 是表示权重的常数，对于特定的网络环境，相应的调整权重系数，提高了资源分配的灵活性，比如要减少计算资源的开销时，可以适当增大 λ_1 的权重值。

根据备份冗余后 VNF f 的的可靠性增量和资源需求，可以得出备份冗余 VNF f 的单位开销：

$$\delta_f=\frac{\sum_{n\in N}x_n^fd_f}{\Delta_f} \tag{13}$$

为了进一步降低备份冗余开销，本文根据概率重要度定义了 VNF f 的备份代价重要度（BCI），以评估其在 VNF 转发图中的重要性：

$$BCI_f=\frac{BIM_f}{\delta_f} \tag{14}$$

BCI 有效评估了 VNF f 在 VNF 转发图中的重要度，尤其能够反映为多条服务功能链共享的 VNF 的重要性[10]。BCI 值是概率重要度 BIM 和单位资源开销 δ_f 的比值，能够准确的反映 VNF 的重要性，即 BCI 值越高的 VNF，当进行备份后，获得系统的可靠性增量最高，且消耗的资源最小。这些 VNF 发生故障将会导致更加广泛的网络服务中断，会严重影响移动通信用户的业务体验。另外，若单一物理节点备份多个 VNF，其发生故障后，将导致多个网络服务中断。通过对比实验，本文设置单一物理节点至多备份 2 个 VNF 获得的可靠性增量最大，因此通过选择具有最大和次大 BCI 值的 VNF 进行联合备份可以提高备份冗余资源成本收益，有效减少了备份资源开销。本文算法通过迭代的方式，将具有最大和次大 BCI 值的 VNF 进行联合备份，能够实现较好的备份冗余成本收益。

2.2　更新模型

为了提高本文算法的收敛速度，在备份冗余 VNF 部署后，需要对 VNF 转发图进行更新。由于将过多的备份 VNF 映射到同一物理节点会降低系统的可靠性，限定同一物理节点至多实例化 2 个备份 VNF。由于选择具有最大和次大 BCI 值的 VNF 进行联合备份，共有两种更新形式：

a）物理节点实例化了同一服务功能链的 2 个备份 VNF，将初始 VNF 和备份 VNF 更新为新的 VNF，如图 2 所示。新的 VNF 的可靠性值为

$$r_{vnf_7}=r_{vnf_{3,4}}+(1-r_{vnf_{3,4}})r_{vnf_3}r_{vnf_4} \tag{15}$$

图 2　形式一的更新过程

b）物理节点实例化了不同服务功能链的 2 个备份 VNF，分别在相应的服务功能链中更新 VNF，如图 3 所示。新的可靠性值为

$$r_{vnf_{11}}=1-(1-r_{vnf_3})(1-r_{vnf_{3,8}}) \tag{16}$$

$$r_{vnf_{12}}=1-(1-r_{vnf_8})(1-r_{vnf_{3,8}}) \tag{17}$$

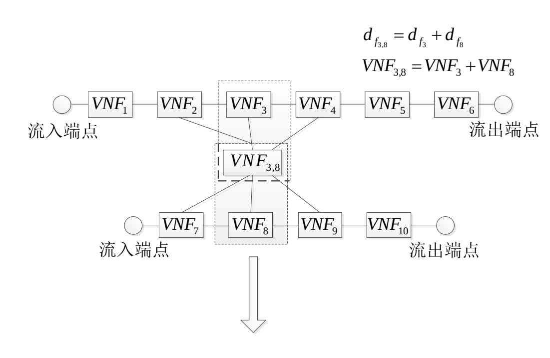


图 3 形式二的更新过程

本文提出的算法的伪代码如下所示：

基于备份代价重要度的虚拟网络功能备份算法（BCIA）

输入：物理网络 $G_p(N,E)$，服务功能链请求 S，初步部署后的 VNF 转发图 $G_{FG}(F,L)$

输出：备份冗余方案 $\{x_n^f \mid f\in F, n\in N\}$

1: 计算每个服务功能链 $s_i(i\in[1,|S|]_z)$ 的可靠性值 θ_i

2: while $\theta_i<\theta_{req}^i, for\ \forall i\in S\ do$

3: 将 G_{FG} 中已接受服务功能链请求中的 VNF 移除，生成新的 VNF 转发图 G'_{FG}

4: for $f\in G'_{FG}$ and $n\in N$ do

5: $n'\leftarrow$ 根据选择模型，选择具有最大 BCI 值的 VNF f' 和次大 BCI 值的 VNF f''，并根据其资源需求找到实例化 2 个 VNF 的物理节点 n'

6: if $n'\in N$ then

7: $x_{n'}^{f'}=1\ \&\ x_{n'}^{f''}=1$

8: 根据更新模型，将初始 VNF 和备份 VNF 生成新的 VNF

9: 更新 r_f,θ_i for $f\in F, i\in S$

10: end

11: end

12: end

13: return $\{x_n^f \mid f\in F, n\in N\}$

3 仿真实验与性能分析

为了评估模型可行性及算法的有效性，本文采用总的备份代价、备份资源占用的物理节点数目、备份资源效益和请求接受率作为性能评价指标，并与最小开销 MinCost 算法[10]、最大可靠性 MaxRbyInr 算法[10]和 GREP[5]算法进行了比较。

3.1 仿真设置

使用具有 116 个节点的网络拓扑[11]作为物理网络。每个物理节点具有 2000 个单位的资源能力，每个物理节点的可靠性值在[0.9,0.99]间随机分布。

每个服务功能链有 2~6 个 VNF 串联组成。根据谷歌服务的服务等级协议[12]，服务功能链的可靠性需求在{0.95,0.98,0.99,0.995,0.999}中选择。

假设 VNF 转发图中共有 1100 个服务功能链，每个服务功能链请求由多个 VNF 串联构成，数量服从 2~6 的均匀分布，每个 VNF 的资源需求满足[1,30]的随机分布。本文算法运行在 CPU 型号为 Intel i7 4790，内存为 4GB 的个人电脑上，使用 Matlab 进行了仿真实验。

3.2 性能分析

假设 VNF 转发图中共有 1100 个服务功能链，每个服务功能链请求由多个 VNF 串联构成，数量服从 2~6 的均匀分布，每个 VNF 的资源需求满足[1,30]的随机分布。本文算法运行在 CPU 型号为 Intel i7 4790，内存为 4 GB 的个人电脑上，使用 Matlab 进行了仿真实验。

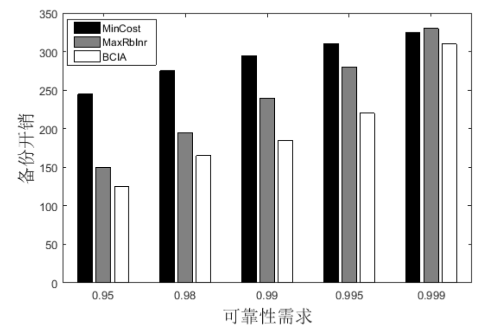


图 4 备份代价对比图

图 4 表示不同可靠性需求下不同算法的备份代价，从图中可以看出，随着可靠性需求的增加，3 种算法的备份代价逐渐增加。在可靠性需求为 0.999 时，BCIA 算法的备份代价仍然最小。

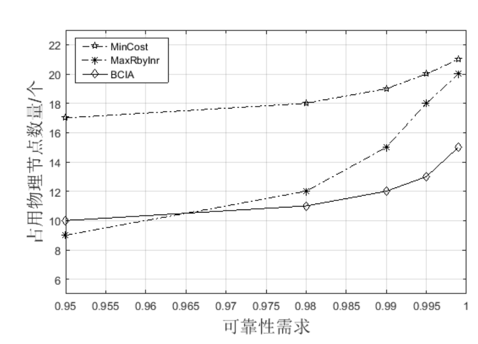


图 5 占用物理节点数量对比图

图 5 表示不同可靠性需求下不同算法备份资源占用的物理节点数目。随着可靠性需求的增加，3 种算法的备份资源占用的物理节点数目逐渐增加。与 MinCost 算法和 MaxRbyInr 算法相比，BCIA 算法分别减少了 32%和 12%的物理节点数量。当可靠性需求为 0.95 时，由于 MaxRbyInr 算法在选择阶段具有最大的可靠性增量，比其它 2 种算法占用的物理节点数目少。但是，当可靠性需求增大时，BCIA 算法占用的物理节点数量最少。

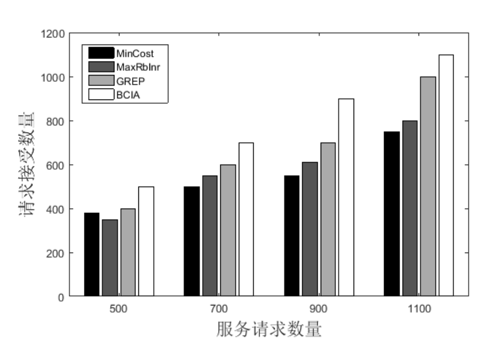


图 6 请求接受数量对比图

图 6 表示不同服务功能链请求数量下不同算法的请求接受率。从图中可以看出，BCIA 算法与其它 2 种算法相比，在发送请求数量相同的情况下，特别是在发送请求数目增多时表现更加明显，接受请求数量明显较高，证明了 BCIA 算法的有效性。该仿真证明了本方法在大量服务功能链请求环境下的优异性能。主要原因是 BCIA 算法在选择阶段具有更高的细粒度，能够有效的提高资源利用率。

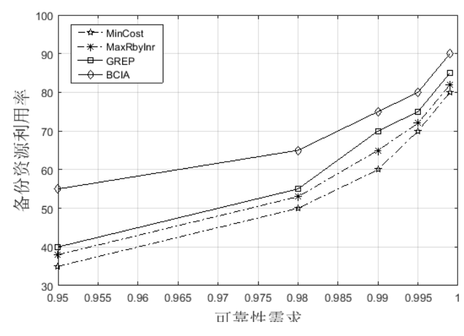


图 7 备份资源利用率对比图

图 7 表示不同可靠性需求下不同算法的备份资源利用率，可以看出其它 3 种方案并未对资源效用进行优化，三者的资源利用率相差不大，而 BCIA 方法和三者相比，提高约 15~20%，明显优于其他三种方案，即以最小的资源开销得到最大的备份冗余收益。

4 结束语

NFV 技术实现了网络功能软件化，通过构建服务功能链实现网络服务的虚拟化，增强了资源配置的伸缩性，促进了基础设施资源的共享。为了保证服务的高可靠性，VNF 节点需要进行冗余备份，因此需要大量的备份资源开销。针对该问题，本文提出的 BCIA 算法，在保证网络服务可靠性需求的同时，有效的降低了备份资源开销，增加了备份资源收益，能够满足 5G 高可靠场景下移动通信服务的需求。

参考文献：

[1] Han Bo, Gopalakrishnan V, Ji Lusheng, *et al.* Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53 (2): 90-97.

[2] Cotroneo D, De Simone L, Iannillo A K, *et al.* Network function virtualization: Challenges and directions for reliability assurance [C]// Proc of IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering. 2014: 37-42.

[3] Network Functions Virtualisation (NFV) ; Reliability; Report on Models and Features for End-to-End Reliability [R]. ETSI ISG NFV, 2016.

[4] ITU-R M 2083-0. IMT vision, framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond [S]. ITU-R, Document 5/199-E, 2015.

[5] Fan Jingyuan, Ye Zilong, Guan Chaowen, *et al.* GREP: Guaranteeing reliability with enhanced protection in NFV [C]// Proc of ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Middleboxes and Network Function Virtualization. New York: ACM Press, 2015: 13-18.

[6] Herker S, An X, Kiess W, *et al.* Data-center architecture impacts on virtualized network functions service chain embedding with high availability requirements [C]// Proc of IEEE Globecom Workshops. 2015: 1-7.

[7] Qu Long, Assi C, Shaban K, *et al.* A reliability-aware network service chain provisioning with delay guarantees in NFV-enabled enterprise datacenter networks [J]. IEEE Trans on Network and Service Management, 2017, 14 (3): 554-568.

[8] Fan Jingyuan, Guan Chaowen, Zhao Yangming, *et al.* Availability-aware mapping of service function chains [C]// Proc of IEEE Conference on Computer Communications. 2017: 1-9.

[9] Birnbaum Z W. On the importance of different components in a multicomponent system [R]. Washington Univ Seattle Lab of Statistical Research, 1968.

[10] Ding Weiran, Yu Hongfang, Luo Shouxi. Enhancing the reliability of services in NFV with the cost-efficient redundancy scheme [C]// Proc of IEEE International Conference on Communications. 2017: 1-6.

[11] Verizon network map [EB/OL]. https://www22. verizon. com/wholesale/images/networkMap. png.

[12] Google Apps service level agreement. [EB/OL]. http://www. google. com/apps/intl/en/terms/sla. htm